

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.364>



西藏冈底斯成矿带西段矿床类型、成矿作用和找矿方向

黄瀚霄¹, 张林奎¹, 刘洪¹, 李光明^{1*}, 黄勇¹, 兰双双², 吕梦鸿²

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081

2. 四川省冶金地质勘查院, 四川成都 610051

摘要:在前人已有成果基础上,通过大量的野外地质调查与室内综合研究,初步论述了冈底斯成矿带西段的金属矿床类型、时空分布特征和成矿作用,探讨了下一步找矿方向。研究表明,冈底斯成矿带西段金属矿床(点)类型主要有矽卡岩型、斑岩型和浅成低温热液型,矿床在空间分布上具有东西成带,相对集中的特征,成矿时代集中于中、新生代。依据矿床成因及成矿动力学背景,冈底斯成矿带西段有5期关键成矿作用,分别为晚三叠世—晚白垩世与新特提斯洋北向俯冲有关的铜金多金属成矿作用、中侏罗世—早白垩世与中特提斯洋南向俯冲有关的铁铜金多金属成矿作用、早白垩世末—晚白垩世末与羌塘—拉萨地块碰撞有关的铜金钼成矿作用、晚白垩世末—始新世与印度—亚洲大陆碰撞有关的铜铅锌银多金属成矿作用、渐新世末—中新世与印度—亚洲大陆后碰撞伸展有关的铜金钼多金属成矿作用。冈底斯成矿带西段优势矿种是铜、铁、铅、锌、金、银等,主攻矿床类型为矽卡岩型矿床、浅成低温热液型矿床和斑岩型矿床等。

关键词: 冈底斯成矿带; 矿床类型; 成矿规律; 成矿作用; 找矿方向; 地球化学。

中图分类号: P612; P617

文章编号: 1000-2383(2019)06-1876-12

收稿日期: 2018-08-17

Major Types, Mineralization and Potential Prospecting Areas in Western Section of the Gangdise Metallogenic Belt, Tibet

Huang Hanxiao¹, Zhang Linkui¹, Liu Hong¹, Li Guangming^{1*}, Huang Yong¹,
Lan Shuangshuang², Lü Menghong²

1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China

2. Sichuan Institute of Metallurgical Geology and Exploration, Chengdu 610051, China

Abstract: Based on previous findings, in this study we conducted field and indoor investigations. We discuss deposit types, spatial and temporal distribution and associated characteristics, metallogenesis, and future prospecting direction of the metallic ore deposits in western Gangdise metallogenic belt (GMB). The results indicate that the metallic ore deposits (or ore spots) in the GMB are composed mainly of skarn-, porphyry- and epithermal-type deposits. These deposits spatially occur along a W-E trending belt and formed within Mesozoic and Cenozoic. The GMB can be divided into five critical periods according to deposit genesis and dynamic settings, including: (1) copper-gold polymetallic mineralization during Late Triassic to Late Cretaceous associated with Neo-Tethys northward subduction; (2) iron-copper-gold polymetallic mineralization during Middle Jurassic to Early Cretaceous

基金项目: 国家重点研发计划 (Nos. SQ2018YFC060162, 2016YFC0600308); 中国地质调查项目 (Nos. DD20160015, DD20190542, DD20190147); 中国科学院战略性先导科技专项 (No. XDA20070304); 西南地质科技创新中心青藏高原国际大学科计划。

作者简介: 黄瀚霄 (1982—), 男, 高级工程师, 从事青藏高原地质矿产、地球化学研究。ORCID: 0000-0001-5868-0457. E-mail: hanxiaohuang@126.com,

* 通讯作者: 李光明 (1965—), 研究员。ORCID: 0000-0003-3383-3693. E-mail: cdliangming@cgs.gov.cn

引用格式: 黄瀚霄, 张林奎, 刘洪, 等, 2019. 西藏冈底斯成矿带西段矿床类型、成矿作用和找矿方向. 地球科学, 44(6): 1876—1887.

associated with Middle-Tethys southward subduction; (3) copper-gold-molybdenum polymetallic mineralization during early of Late Cretaceous to Late Cretaceous associated with collision between Qiangtang and Lhasa blocks; (4) copper-lead-zinc-silver polymetallic mineralization during late of Late Cretaceous to Eocene associated with collision between Asian and Indian continents; and (5) copper-gold-molybdenum polymetallic mineralization during Miocene associated with extension following collision between Asian and Indian continents. Prominent minerals in the GMB are copper, iron, lead-zinc, gold-silver, etc.

Key words: Gangdise metallogenic belt; deposit type; metallogenic regularity; mineralization; prospecting direction; geochemistry.

冈底斯成矿带夹于印度河—雅鲁藏布江结合带与狮泉河—嘉黎蛇绿混杂岩带之间,是我国西部的重点成矿区带之一,其西段是指谢通门县以西的地区。近二十年来,随着地质大调查、商业性矿产勘查工作的实施,冈底斯成矿带西段矿产勘查方面取得了一系列的重大成果,新发现了雄村(Tang *et al.*, 2015)、朱诺(Zheng *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2017)、纳如松多(纪现华等, 2014; 刘英超等, 2015)、查个勒(高顺宝, 2015),以及尼雄(曹圣华等, 2007)等多个大型—超大型矿床,以及日阿(辛洪波和曲晓明, 2006)、罗布真(Sun *et al.*, 2017)等一大批中小型矿床。其中,纳如松多、查个勒、雄村等矿床已建成矿山进行开发,并取得良好的经济效益。本文在前人的工作基础上,初步总结了冈底斯成矿带西段的主要金属矿床类型、时空分布特征和成矿作用,探讨了下一步找矿方向。

1 成矿地质背景

冈底斯成矿带位于拉萨地块中南部,由南至北涉及日喀则弧前盆地、冈底斯火山—岩浆弧、隆格尔—工布江达复合岛弧带和措勤—申扎岩浆弧带等4个Ⅲ级构造单元(图1a)(潘桂棠等, 2006)。目前研究认为,拉萨地块在前寒武纪形成变质岩系陆壳基底,隆格尔—工布江达岩浆弧则于晚三叠世形成;在晚三叠世—早白垩世,拉萨地块同时受控于中特提斯洋南向俯冲和新特提斯洋的北向俯冲,呈现出复杂的多岛弧盆系格局(潘桂棠等, 2006; Zhu *et al.*, 2009);在早白垩世,中特提斯洋消亡,拉萨地块与羌塘地块发生弧—弧软碰撞(潘桂棠等, 2006; Zhu *et al.*, 2011, 2016)。新特提斯洋盆进一步向北俯冲,南冈底斯火山岩浆弧增生在隆格尔—念青唐古拉复合古岛弧带南侧;晚白垩世—古新世,新特提斯洋闭合,喜马拉雅造山带拼合到亚洲大陆南缘,陆壳缩短增厚(侯增谦等, 2006a)。

受中、新特提斯洋构造演化的影响,拉萨地块前寒武纪结晶基底主要由念青唐古拉岩群组成,局

部有少量变质深成侵入体分布(Zhu *et al.*, 2011)。念青唐古拉岩群变质岩相为角闪岩相和绿片岩相,其上被大量石炭—二叠纪变质沉积岩和白垩纪火山沉积地层覆盖(潘桂棠等, 2006; 张立雪等, 2013)。拉萨地块新生地壳主要为中、新生代的海相与海陆交互地层和火山沉积地层(潘桂棠等, 2006)。其中,拉萨地块南部主要为白垩纪—第三纪冈底斯岩基和古新世林子宗火山岩(图1b),有少量三叠纪—白垩纪火山沉积地层(莫宣学等, 2009)。

拉萨地块自古生代以来经历了多旋回的构造岩浆演化(莫宣学, 2009; Zhu *et al.*, 2011)。冈底斯火山—岩浆弧带岩浆作用形成于中、新生代,并以白垩纪和中新世的岩浆作用为主(图1a)(Zhu *et al.*, 2009)。白垩纪侵入岩岩石类型以中酸性岩类为主,是冈底斯成矿带俯冲期侵入岩的主体,岩石地球化学总体表现为I型花岗岩特征(Zhu *et al.*, 2009, 2011)。古新世—始新世岩浆活动与印度—亚洲板块碰撞作用有关,其早期为I型花岗岩,晚期逐渐过渡为S型花岗岩(侯增谦等, 2006a);中新世岩浆形成于印度—亚洲板块后碰撞伸展阶段,岩石具有埃达克质岩的特征(侯增谦等, 2006b)。隆格尔—念青唐古拉复合古岛弧带沿东西向断续出露晚三叠世和晚侏罗世岩浆岩,晚三叠世岩浆岩类型主要有闪长岩、花岗闪长岩,具有岛弧花岗岩的特征;晚侏罗世中酸性岩发育在隆格尔—念青唐古拉复合古岛弧带中部许如错北侧一带。措勤—申扎岩浆弧带岩浆岩主要形成于白垩纪。早白垩世岩体具有岛弧花岗岩特征,被认为是中特提斯洋壳南向俯冲作用下的岩浆响应(Zhu *et al.*, 2011; 苟正彬等, 2018);晚白垩世岩浆岩具有埃达克岩的特征,是加厚下地壳发生拆离并发生部分熔融所致(Liu *et al.*, 2018)。

侏罗纪—白垩纪海相火山岩与弧侵入岩一起构成了冈底斯火山—岩浆弧带的主体(潘桂棠等, 2006)。该期火山岩具有岛弧火山岩的特征,是新特提斯沿拉萨地块南缘北向俯冲消减过程中的产物,多呈夹层赋存于同时代沉积地层中(潘桂棠等, 2006)。林子宗群火山岩在冈底斯成

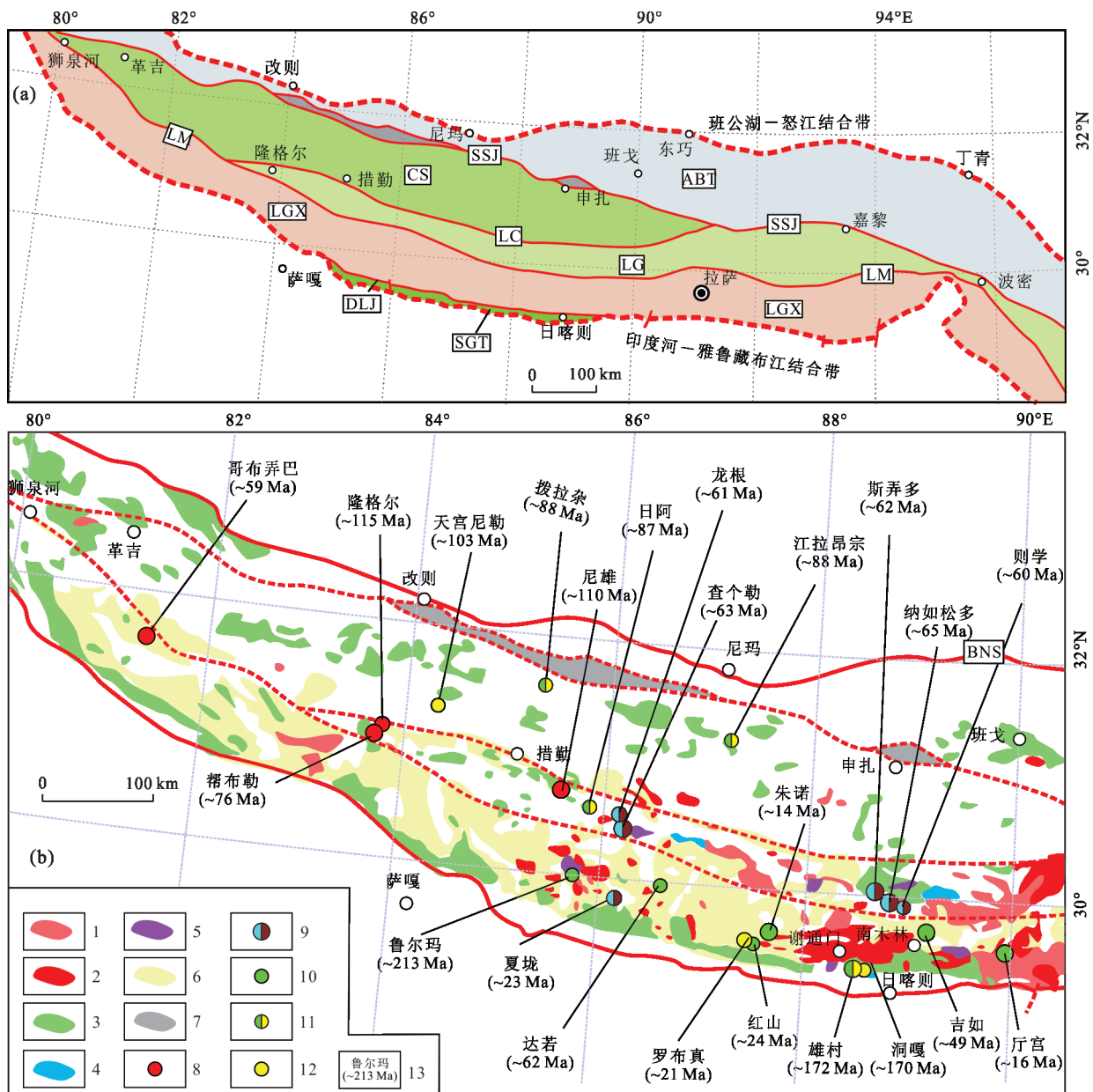


图 1 冈底斯成矿带西段矿产地质略图

Fig.1 Mineral resources geological map of the western section of the Gangdise metallogenic belt

1. 新近纪侵入岩; 2. 古近纪侵入岩; 3. 白垩纪侵入岩; 4. 侏罗纪侵入岩; 5. 三叠纪侵入岩; 6. 古近系林子宗群火山岩; 7. 蛇绿岩混杂带; 8. 铁矿床; 9. 铅锌矿床; 10. 铜矿床; 11. 铜金矿床; 12. 金矿床; 13. 矿床名称及成岩/成矿时代; 图 b 中, ABT. 昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆弧带; SSJ. 狮泉河-嘉黎蛇绿混杂岩带; CS. 措勤-申扎岩浆弧带; LC. 隆格尔-措麦断裂带; LG. 隆格尔-工布江达复合岛弧带; LM. 洛巴堆-米拉山断裂带; LGX. 冈底斯火山岩岩浆弧带; DLJ. 打加南-拉马野加-江当乡断裂; SGT. 日喀则弧前盆地; 图 a 中, ABT. 昂龙岗日-班戈-腾冲岩浆弧带; SSJ. 狮泉河-嘉黎蛇绿混杂岩带; CS. 措勤-申扎岩浆弧带; LC. 隆格尔-措麦断裂带; LG. 隆格尔-工布江达复合岛弧带; LM. 洛巴堆-米拉山断裂带; LGX. 冈底斯火山岩岩浆弧带; DLJ. 打加南-拉马野加-江当乡断裂; SGT. 日喀则弧前盆地

矿带中规模最大, 代表着白垩纪晚期-早新生代青藏高原南部的一次大规模的构造岩浆事件(唐菊兴等, 2016). 林子宗群火山岩主要由中酸性火山岩组成, 自下而上可分为典中组、年波组和帕那组. 典中组火山岩形成于新特提斯大洋岩石圈

俯冲晚期到印度-亚洲初始碰撞阶段, 年波组下部形成于印度-亚洲大陆同碰撞阶段, 年波组晚期和帕那组火山岩则是板片断离的结果(Zhu et al., 2017).

2 典型矿床及类型

冈底斯成矿带西段主要矿种为金、银、铜、铅、锌和铁,大部分矿床(点)为预查—普查程度,仅少数矿床达到详查—勘探程度。经评价,资源量达到大型—超大型规模的矿床共计8处,分别为雄村铜金矿床、朱诺铜金矿床、斯弄多铅锌银多金属矿床、查个勒铅锌矿床、帮布勒铅锌矿床、纳如松多铅锌矿床、尼雄铁矿床、哥布弄巴铁多金属矿床等。近年来,冈底斯成矿带西段又新发现鲁尔玛铜矿床、达若铜矿床、罗布真金银多金属矿床等一系列中小型矿床,展示出巨大的找矿潜力(图1c)。冈底斯成矿带西段典型矿床地质特征详见附表1。根据矿床的形成作用和成矿特点,冈底斯成矿带西段的金属矿床大致可划分为矽卡岩型、斑岩型、浅成低温热液型等3种矿床类型。

斑岩型矿床主要是指在时空上与中酸性斑岩体有关的细脉浸染型矿床。雄村和朱诺是冈底斯成矿带西段已评价出的超大型斑岩型铜金矿床,此外还存在拨拉杂、鲁尔玛、达若等中小型斑岩型铜矿床。该类矿床多产于近东西向与南北向构造带交汇部位。含矿斑岩体一般为中酸性侵入岩小岩株,而铜矿化主要产于斑岩顶部及围岩中,围岩为碎屑岩或火山岩(Tang *et al.*, 2015; Huang *et al.*, 2017)。围岩蚀变与成矿关系密切,含矿斑岩体由内向外可分为钾硅化带、黄铁绢英岩化带、青磐岩化带,部分矿床缺少泥化带,矿化主要发育在黄铁绢英岩化带中。值得注意的是,朱诺、达若等矿床为单一斑岩型矿化(Huang *et al.*, 2017);拨拉杂地表上部是矽卡岩型铜矿化,下部为斑岩型钼矿化,其矿化类型组合为斑岩—矽卡岩型矿化(黄瀚霄等, 2013);而雄村和红山等斑岩型矿床外围发育浅成低温热液型矿床,构成斑岩—浅成低温热液型成矿系统(唐菊兴等, 2014)。

浅成低温热液型矿床主要是指与火山—侵入岩系有关,在地壳浅部,低温低压环境下形成的一类矿床。典型矿床代表有斯弄多、纳如松多、罗布真等。该类矿床受火山或旁侧的断裂控制,同时发育隐爆角砾岩型矿化、热液型矿化和矽卡岩型矿化等多种矿化型式(刘英超等, 2015; 唐菊兴等, 2016)。矿石具有角砾状、网脉状等典型热液型矿床构造。围岩蚀变类型主要有冰长石化、绿泥石化、硅化、绢云母化和碳酸盐化等(唐菊兴等, 2016)。其中,斯弄多和罗布真矿床属于低硫化型浅成低温热液型矿床(唐菊兴等, 2016)。

矽卡岩型矿床主要是指中酸性侵入体的含矿热液交代碳酸盐类等岩石而形成的矿床。查个勒铅锌矿床和尼雄铁矿床等均属于大型矽卡岩型矿床。该类矿床分布在中酸性侵入岩与含碳酸盐岩地层接触带附近。控矿岩体一般为不同时期的浅成高位、中酸性小岩体(高顺宝, 2015)。矿体受围岩和岩体形态双重控制,产于接触带的矽卡岩或围岩裂隙中。矿化类型主要为铁矿、铜金矿、铅锌矿等。

3 矿床时空分布特征

冈底斯成矿带西段主要矿床的成矿年龄及测试方法详见表1。斑岩型铜矿床形成时代跨度较大,鲁尔玛铜矿床、雄村铜金矿床、拨拉杂铜钼矿床、达若铜矿床和朱诺铜矿床分别形成于晚三叠世、中侏罗世、晚白垩世、古新世和中新世。浅成低温热液型矿床成矿作用同样具有多期次的特征。以纳如松多和斯弄多为代表的矿床形成于晚白垩世—古新世;而与斑岩型铜金矿床共生的洞嘎和罗布真等矿床分别形成于中侏罗世和渐新世末—中新世。此外,冈底斯成矿带西段还可能存在晚白垩世浅成低温热液型矿床(李永灿等, 2017)。矽卡岩型矿床发育在早白垩世、晚白垩世和古新世。尼雄、隆格尔和天公尼勒等矿床的成矿时代集中在120~110 Ma,属于早白垩世;江拉昂宗、日阿以及帮布勒等矿床形成于晚白垩世;查个勒、龙根、哥布弄巴等矿床形成于晚白垩世末—古新世。总体来看,目前所发现的矿床(点)几乎全部形成于中生代—新生代的范围内,且大多数矿床年龄集中于早白垩世—古新世。

大地构造环境是控制地壳中矿化分布的重要因素(李永灿等, 2017)。受中、新特提斯洋构造演化的影响,冈底斯成矿带西段的矿床在空间分布上具有东西成带分布特征,但由于地质工作程度的不均匀性,造成带内发现的矿床(点)在空间上同时相对集中。斑岩型矿床主要分布在冈底斯火山—岩浆弧内,集中分布在昂仁县朱诺,以及谢通门县雄村地区,极少量分布于措勤—申扎岛弧带内,如拨拉杂铜钼矿床。浅成低温热液型矿床在冈底斯成矿带西段分布较为广泛,中、北部浅成低温热液型矿床与晚白垩世—古新世火山岩分布关系密切,主要分布在措勤县诺仓—住浪和谢通门县斯弄多地区,而南部的浅成低温热液型矿床在时空上与斑岩型矿床共生,分布在昂仁县朱诺和谢通门县雄村等地。矽卡岩型矿床受不同时代的中酸性侵入岩和古生

表 1 冈底斯成矿带西段代表性矿床成岩成矿时代						
Table 1 Diagenetic and metallogenic epoch of representative ore deposits in the western Gangdese metallogenic belt						
矿区	矿床类型	岩石/矿石	测试对象	测试方法	年龄(Ma)	资料来源
雄村铜金矿床	斑岩型	凝灰岩	锆石	SHRIMP	176±5	Tang <i>et al.</i> , 2015
		石英闪长玢岩	锆石	SHRIMP	173±3	
		铜金矿石	辉钼矿	Re-Os	173.2±2.7	
朱诺铜金矿床	斑岩型	花岗斑岩	锆石	SHRIMP	15.6±0.6	Zheng <i>et al.</i> , 2007
		矿石	辉钼矿	Re-Os	13.72±0.62	
斯弄多铅锌银多金属矿床	浅成低温热液型	流纹斑岩	锆石	LA-ICP-MS	64.18±0.73	丁帅等, 2017
		花岗斑岩	锆石	LA-ICP-MS	68.2±0.32	
查个勒铅锌矿床	矽卡岩型	矿石	辉钼矿	Re-Os	61.49±0.60	高顺宝, 2015
		花岗斑岩	锆石	LA-ICP-MS	63.18±0.77	
帮布勒铁铅锌矿床*	矽卡岩型	石英斑岩	锆石	LA-ICP-MS	76.34±0.83	黄鹏程等, 2015
纳如松多铅锌矿床	浅成低温热液型	矿石	绢云母	Ar-Ar	57.81±0.66	纪现华等, 2014
		石英正长斑岩	锆石	SHRIMP	62.54±0.77	
尼雄铁矿床	矽卡岩型	矿石	金云母	Ar-Ar	112.3	于玉帅等, 2012
		花岗闪长岩	锆石	LA-ICP-MS	113.6±1.6	
		二长花岗岩	锆石	LA-ICP-MS	112.6±1.6	
隆格尔铁矿床*	矽卡岩型	二长花岗岩	锆石	LA-ICP-MS	115.5±2.1	费凡等, 2015
鲁尔玛铜矿床	斑岩型	石英二长斑岩	锆石	LA-ICP-MS	212±1	刘洪等, 待发表
		矿石	辉钼矿	Re-Os	212±3	
罗布真金银多金属矿床	浅成低温热液型	矿石	石英	Rb-Sr	21.1±1.8	黄瀚霄等, 待发表
达若铜矿床*	斑岩型	英安斑岩	锆石	LA-ICP-MS	63	李红梁等, 待发表
日阿铜金矿床	矽卡岩型	矿石	金云母	Ar-Ar	87.69±0.64	辛洪波和曲晓明, 2006
		黑云母花岗岩	锆石	LA-ICP-MS	89.9±1.6	
夏垅铅锌银矿床	引爆角砾岩型	矿石	绢云母	Ar-Ar	23.56±0.22	赵晓燕等, 2013
龙根铅锌矿床*	矽卡岩型	二长花岗斑岩	锆石	LA-ICP-MS	61.4±1.2	段志明等, 2014
江拉昂宗铜多金属矿床	矽卡岩型	角闪花岗岩	锆石	LA-ICP-MS	86±1	Liu <i>et al.</i> , 2018
		矿石	绢云母	Ar-Ar	85±1	
天宫尼勒金矿床*	矽卡岩型	花岗闪长岩	锆石	LA-ICP-MS	102.6±1.8	黄瀚霄等, 2012
拨拉杂铜钼矿床	斑岩+矽卡岩型	二长花岗斑岩	锆石	LA-ICP-MS	88.0±1.6	黄瀚霄等, 2013; 余红霞等, 2011
		矿石	辉钼矿	Re-Os	88.8±1.5	
哥布弄巴铁及多金属矿床	矽卡岩型	细粒二长花岗岩	锆石	LA-ICP-MS	59.1±0.75	高顺宝, 2015
		矽卡岩	白云母	Ar-Ar	59.22±0.61	
红山铜矿床	斑岩型	矿石	辉钼矿	Re-Os	23	黄瀚霄等, 待发表
		花岗斑岩	锆石	LA-ICP-MS	24±1	

注: *. 矿床缺少精确的成矿年龄, 本文用与成矿相关的花岗岩成岩年龄近似代表矿床成矿年龄。

代一中生代含碳酸盐岩地层控制, 集中分布在仲巴县隆格尔—措勤县尼雄, 昂仁县如萨乡和谢通门县梅巴切勤乡等地区。革吉县亚热乡、改则县麻米乡—仲巴县帕江乡一带也发现少量的矽卡岩型矿床。

4 成矿作用

冈底斯成矿带西段自前寒武结晶基底以来, 经历了古生代、中生代离散—聚合和新生代印度—亚洲大陆碰撞作用造山等动力学过程, 发育 5 期关键

成矿作用(图 2)。

4.1 晚三叠世—晚白垩世与新特提斯洋北向俯冲有关的铜金多金属成矿作用

在晚三叠世, 新特提斯洋开始向北俯冲至拉萨地块之下, 来源于俯冲洋壳的脱水流体交代上覆地幔楔, 致使地幔楔部分熔融形成高氧逸度岩浆。岩浆喷出地表冷却凝固形成雄村组、桑日群等岛弧火山岩(曲晓明等, 2007), 而岩浆冷凝分异出的含矿流体在侵入岩体顶部或长英质围岩中形成斑岩型和浅成低温热液型矿床(郎兴海等, 2012a)。该期成

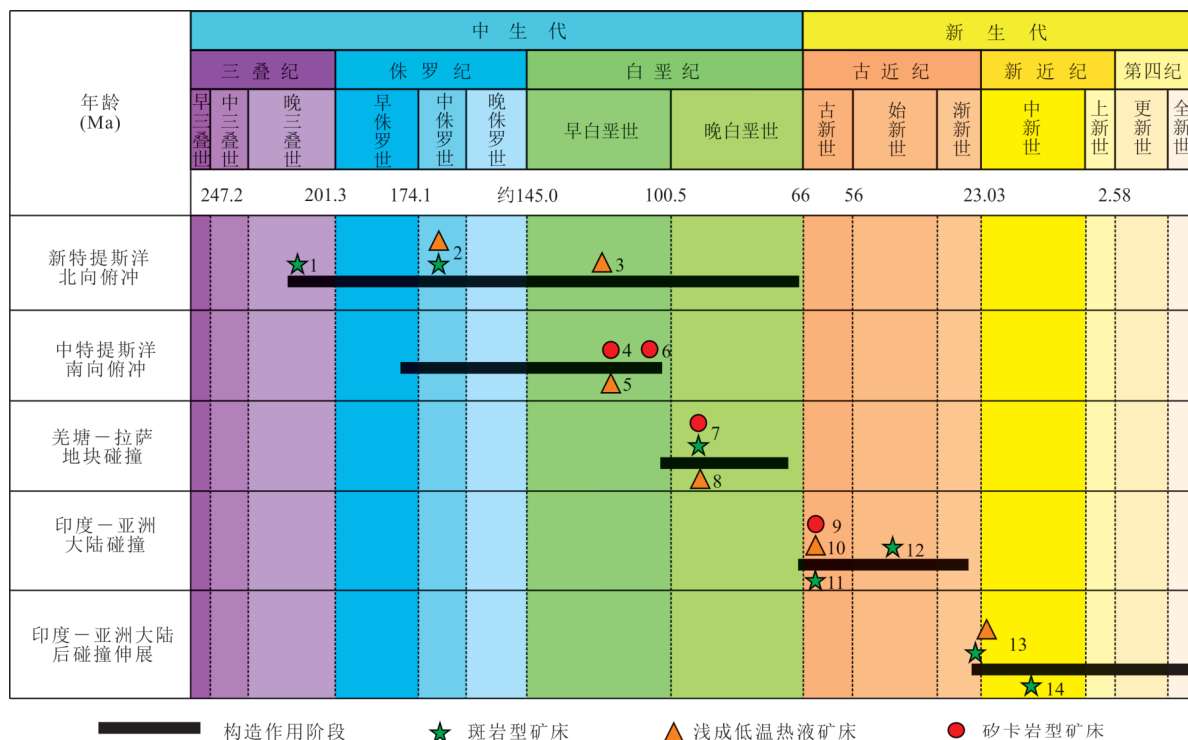


图2 冈底斯成矿带西段地质构造与成矿演化

Fig.2 Summary of the geotectonic and metallogenic evolution of western Gangdise metallogenic belt

1. 鲁尔玛斑岩型铜矿床; 2. 雄村—洞嘎斑岩—浅成低温热液型铜金成矿系统; 3. 桑日群中浅成低温热液型铜金多金属矿床; 4. 尼雄等矽卡岩型铁矿床; 5. 住浪等则弄群中的浅成低温热液型铜金多金属矿床; 6. 天宫尼勒矽卡岩型金矿床; 7. 拔拉杂铜金矽卡岩—斑岩型铜金成矿系统; 8. 布东拉浅成低温热液型金矿床; 9. 斯弄多等浅成低温热液型铅锌(银)矿床; 10. 查个勒等矽卡岩型铅锌矿床; 11. 达若斑岩型铜矿床; 12. 吉如等斑岩型铜金矿床; 13. 罗布真—红山斑岩—浅成低温热液型铜金成矿系统; 14. 朱诺等斑岩型铜金矿床

矿作用主要发生在拉萨地块南部冈底斯火山—岩浆弧内, 典型矿床有鲁尔玛、雄村, 以及雄村外围的洞嘎、洞嘎普等矿床。

雄村铜金矿床主要赋存在角闪石英闪长玢岩和雄村组的凝灰岩中。角闪石英闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄为 173 ± 3 Ma, 矿石中辉钼矿 Re-Os 年龄 173.2 ± 2.7 Ma, 说明斑岩型矿床的成矿作用与角闪石英闪长玢岩有关, 矿床形成于中侏罗世 (Tang *et al.*, 2015); 角闪石英闪长玢岩具有与岛弧火山岩相类似的地球化学特征, 是俯冲带的新特提斯洋壳释放出的流体交代楔形地幔区的 EMI 型富集地幔的产物 (黄勇等, 2011)。成矿流体来自大气水和岩浆水的混合, 属于富含 CO_2 、 N_2 和有机气体的 Na^+ - K^+ - Ca^{2+} - Cl^- - SO_4^{2-} - HS^- - CO_3^{2-} 体系, 其铜金等成矿物质主要来源深部岩浆 (黄勇等, 2011)。雄村外围的洞嘎金矿床产于雄村组火山岩中, 其成矿时代与雄村铜金矿床相近, 成矿流体和成矿物质均来源于岩浆 (邢俊兵等, 2003)。由此可见, 雄村斑岩型铜金矿床和洞嘎金矿床受控于构造—岩浆作用, 属于中侏罗

世与火山—岩浆作用有关的斑岩—浅成低温热液成矿系统 (唐菊兴等, 2014)。

4.2 中侏罗世—早白垩世与中特提斯洋南向俯冲有关的铁铜金多金属成矿作用

中侏罗世—早白垩世, 中特提斯洋持续向南俯冲, 俯冲板片流体交代地幔楔形成基性熔体, 基性熔体底侵下地壳, 促使下地壳物质部分熔融, 形成壳幔混合成因岩浆 (张晓倩等, 2010; 李永灿等, 2017)。岩浆沿断裂上升, 侵位于古生代和中生代的富含碳酸盐岩地层形成矽卡岩型矿床 (张晓倩等, 2010); 岩浆喷出地表形成则弄群火山岩及其相关的热液型矿床。该期成矿作用发生在拉萨地块中部的隆格尔—工布江达复合岛弧带和措勤—申扎岩浆弧带中, 典型矿床有尼雄、隆格尔、天公尼勒等矽卡岩型矿床和住浪、拔隆热液型矿点。成矿元素主要为铁, 其次为铜金银铅锌锡等。

尼雄、隆格尔等富铁矽卡岩型矿床产于中酸性侵入岩和二叠纪含灰岩地层的接触带附近, 其成矿时代集中在 $120 \sim 110$ Ma, 属于早白垩世 (张晓倩

等, 2010). 含闪长质包体的成矿岩体具有岛弧型花岗岩的地球化学特征, 形成于中特提斯洋壳岩石圈南向俯冲背景, 是中上地壳来源的壳源熔体和古老岩石圈地幔来源的幔源熔体不同比例混合而成(张晓倩等, 2010; 费凡等, 2015). 成矿流体和成矿物质主要来源于花岗质岩浆. 天公尼勒等金矿床则形成时间略晚于尼雄等富铁矽卡岩型矿床, 主要为早白垩世末期(黄瀚霄等, 2012). 成矿物质主要来源于岩浆和含碳酸盐岩地层, 成矿流体显示为岩浆热液流体的特征. 住浪和拔隆等热液型矿点受则弄群火山断陷盆地的边缘断层和火山机构的控制, 成矿作用发生在火山活动中晚期(高顺宝, 2015). 经评价, 该类矿床规模较小.

4.3 早白垩世末-晚白垩世与羌塘-拉萨地块碰撞有关的铜金钼成矿作用

在早白垩世末期-晚白垩世, 中特提斯洋闭合, 拉萨地块与羌塘地块发生碰撞(潘桂棠等, 2006). 拉萨地块中北部地壳受碰撞造山作用影响, 不断的缩短和加厚. 在晚白垩世初期, 拉萨地块中北部加厚下地壳拆沉并发生部分熔融形成含矿岩浆(余红霞等, 2011), 含矿岩浆沿碰撞后伸展环境下形成的深大断裂上升, 并侵位于拉嘎组、下拉组、郎山组等地层, 形成矽卡岩型矿床和斑岩型矿床; 部分含矿热液受断裂构造控制形成浅成低温热液型矿床(李永灿等, 2017). 该期成矿作用发生在拉萨地块中部的隆格尔-工布江达复合岛弧带和措勤-申扎岩浆弧带中, 代表性矿床有拨拉杂、日阿、江拉昂宗、布东拉等, 矿床类型主要为矽卡岩型、斑岩型和浅成低温热液型等. 成矿元素主要为铜金钼等.

日阿、江拉昂宗等矿床明显受晚白垩世中酸性岩体与含碳酸盐岩地层控制, 属于单一的矽卡岩型铜金矿床, 其成矿时间集中在 90 Ma 左右(Liu *et al.*, 2018). 成矿岩体属于 I 型花岗岩, 源区为壳幔混合来源(Liu *et al.*, 2018). 成矿物质为壳幔混合来源. 拨拉杂矿床地表发育矽卡岩型铜矿体, 深部存在细脉浸染状矿化的斑岩型钼矿体, 属于斑岩型-矽卡岩型复合矿床. 拨拉杂含矿斑岩锆石 U-Pb 年龄为 88.0 ± 1.6 Ma, 辉钼矿 Re-Os 年龄是 88.8 ± 1.5 Ma, 表明矿床形成于晚白垩世(余红霞等, 2011; 黄瀚霄等, 2013). 含矿斑岩具有埃达克质岩特征, 是拆沉下地壳部分熔融的产物(余红霞等, 2011). 以东拉金矿床为代表的浅成低温热液型矿床, 目前未有成矿作用研究资料, 但根据矿化特征判断, 其成矿应与晚白垩

世中酸性侵入岩有成因联系(李永灿等, 2017).

4.4 晚白垩世末-渐新世与印度-亚洲大陆碰撞有关的铜铅锌银多金属成矿作用

晚白垩世末期-渐新世, 新特提斯洋闭合, 印度大陆与亚洲大陆碰撞, 在拉萨地块南缘形成大型剪切带及一系列近东西向逆冲推覆构造体系, 下地壳脱水形成的变质流体在韧性剪切带浅部富集形成造山型金矿床(侯增谦等, 2006a). 新特提斯洋壳板片携印度陆壳陡俯冲于拉萨地块之下, 导致地幔楔和局部下地壳发生部分熔融形成壳幔混合成因的岩浆, 岩浆喷发出地表形成林子宗群火山岩. 岩浆结晶过程中分异出来的成矿流体在次火山岩顶部及与围岩的接触带形成了斑岩型矿床(侯增谦等, 2006a); 含矿流体在断裂前缘位置, 通过引爆和减压沸腾, 形成角砾岩筒和细脉浸染状等矿化形式的浅成低温热液型矿床, 部分沿断裂运移的含矿热液与灰岩交代形成矽卡岩型矿床(刘英超等, 2015; 丁帅等, 2017). 该成矿作用普遍发生在冈底斯火山-岩浆弧和隆格尔-工布江达复合岛弧带内, 典型矿床(点)有查个勒、纳如松多、斯弄多、达若、仁钦则等, 主要矿床类型为矽卡岩型、斑岩型、造山型和浅成低温热液型.

以查个勒、龙根等铅锌矿床为代表的单一性矽卡岩型矿床形成于古新世(段志明等, 2014; 高顺宝, 2015). 成矿花岗岩具有过铝质 S 型花岗岩特征, 与幔源岩浆底侵导致的拉萨地块古老地壳物质部分熔融有关. 成矿流体主要由岩浆水与大气降水混合组成, 成矿物质主要来自上地壳岩浆源. 纳如松多和斯弄多等矿床产于林子宗群火山岩中, 发育矽卡岩型、热液脉型和角砾岩筒型等多类矿体, 属于与晚白垩世末-古新世与岩浆作用有关的浅成低温热液型矿床(纪现华等, 2014). 成矿流体具有由大气水下渗循环构成的地热水的属性, 成矿物质主要来源于林子宗群火山岩或深部的岩浆. 达若铜矿床产于英安斑岩顶部, 其围岩为林子宗群典中组凝灰岩. 该矿床是冈底斯成矿带西段目前发现的唯一古新世斑岩型矿床. 仁钦则产于拉萨地块南缘剪切带内, 其矿床类型属于与地壳水平剪切变形作用有关的造山型金矿床(侯增谦等, 2006a).

4.5 渐新世末-中新世与印度-亚洲大陆后碰撞伸展有关的铜金钼多金属成矿作用

渐新世末-中新世, 冈底斯造山带由汇聚造山转换为伸展走滑. 软流圈幔源岩浆上涌底侵新生加

厚下地壳,下地壳部分熔融产生长英质岩浆;长英质岩浆与幔源岩浆有限混合,在地壳伸展环境下沿近东西向构造浅成侵位,形成斑岩体有关的成矿系统(侯增谦等,2006b)。该成矿作用主要发生在冈底斯火山—岩浆弧内,矿床类型以斑岩型矿床为主,其次为浅成低温热液型矿床和矽卡岩型矿床。

目前发现的斑岩型矿床和浅成低温热液型矿床集中产于朱诺矿集区。朱诺铜金矿床属于中新世的单一型斑岩型矿床。含矿斑岩在地球化学上富钾高碱,来源于加厚下地壳和富集地幔岩浆源区的部分熔融(Huang *et al.*, 2017)。初始成矿流体为 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系,成矿物质主要来源于岩浆,且带有古老地壳物质的印记(Huang *et al.*, 2017)。朱诺矿集区的罗布真金银矿床产于林子宗群火山岩与始新世闪长岩的接触部位,矿体受近东西向断裂构造控制。含矿石英Rb-Sr等时线年龄为 21.1 ± 1.8 Ma,指示矿床形成于中新世。矿床成矿流体来源主要为岩浆水和大气水的混合,且以大气水为主,属于中温、中低盐度的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl} \pm \text{CO}_2$ 体系,成矿物质主要来源于深部岩浆(Sun *et al.*, 2017)。罗布真南部的红山斑岩型矿床与成矿有关的花岗闪长斑岩年龄为 ~ 24 Ma,表明矿床形成于渐新世末。该矿床与罗布真金银矿床构成斑岩型—浅成低温热液型成矿系统(Sun *et al.*, 2017)。

5 下一步找矿方向

冈底斯成矿带西段地质调查的工作程度明显不及东段,其矿产资源潜力急需摸清。通过对冈底斯成矿带西段已发现的矿床特征总结分析,初步确定铜、铁、铅锌、金银为优势矿种,矽卡岩型矿床、浅成低温热液型矿床和斑岩型矿床为主攻矿床类型。

5.1 斑岩型铜矿床勘查

西藏冈底斯斑岩型铜矿带一般东起工布江达县,西至昂仁县(88°E),东西长为约600 km。该成矿带以新生地壳为特征,但昂仁县以西地区却存在古老基底(张立雪等,2013)。拉萨地块南部古新世—始新世岩浆岩都是下地壳加水熔融所形成(Hou *et al.*, 2011)。然而,受大陆俯冲带热构造和向陆壳俯冲角度与深度的限制,昂仁县(88°E)以西的古新世—始新世岩浆岩比以东同期岩浆岩具有相对较低的锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 值(Wang *et al.*, 2018),且岩浆上升过程中缺乏开放的地幔窗,致使其规模较小。由于,昂仁县东西两侧地壳组成和岩浆岩化学性

质、规模的差异致使“昂仁县以西是否存在斑岩型铜矿床”这问题存在争议。近年来,在昂仁县以西相继发现拔拉杂、鲁尔玛、达若等斑岩型矿床,以及和斑岩型有关的夏垅隐爆角砾岩型铅锌银矿床,表明昂仁县以西的地区仍然存在巨大的斑岩型矿床找矿潜力。通过对现有斑岩型矿床的分析,昂仁县以西的斑岩型矿床评价工作仍面临着两个问题。

第一个问题是冈底斯成矿带东、西两段斑岩型成矿作用是否存在差异?众所周知,冈底斯成矿带东段斑岩型铜矿床形成于始新世和渐新世末—中新世,其成矿与印度—亚洲大陆碰撞及碰撞过程的伸展作用有关(侯增谦等,2006a, 2006b)。冈底斯成矿带西段除朱诺为代表的渐新世末—中新世成矿期外,还存在晚三叠世、中侏罗世、晚白垩世,以及古新世等多个成矿期。鲁尔玛和雄村分别形成于晚三叠世和中侏罗世,其成矿背景为新特提斯洋北向俯冲(Tang *et al.*, 2015);晚白垩世的拔拉杂铜钼矿床形成于拉萨—羌塘地块的碰撞环境(余红霞等, 2011);而古新世达若铜矿床则与印度—亚洲大陆碰撞有关。从成矿物质来源来看,雄村斑岩型铜金矿床成矿物质主要来源于地幔,有很少的地壳物质加入;朱诺斑岩型铜矿床成矿物质来源虽与东段的甲玛、驱龙等斑岩矿床相同,表现出成矿物质来源于下地壳的岩浆,有较少的幔源成分混染的特征,但却明显存在古老拉萨地体参与的印迹,显示了区域上的独特性(Huang *et al.*, 2017)。由此可见,冈底斯成矿带东、西两段斑岩型矿床的成矿过程和成矿背景存在一定的差异,这将导致西段的斑岩型铜矿成矿条件和矿化形式不全同于东段,因此仅凭东段斑岩型矿床勘查经验很难在西段斑岩型矿床勘查中有所突破。

第二个问题是冈底斯成矿带西段斑岩型矿床埋藏深度和剥蚀程度问题。朱诺铜矿床成矿深度为2.3~2.9 km,而驱龙成矿深度为3.0~3.6 km,说明冈底斯成矿带西段斑岩型矿床成矿深度比东段的略浅,利于矿床发现。但是,青藏高原隆升却存在差异剥蚀。冈底斯成矿带东段地表的火山岩高度剥蚀,大部分斑岩型矿床出露地表(唐菊兴等, 2017)。如果冈底斯成矿带西段斑岩型矿床同东段一样伏于火山岩之下,那么西段大量的未剥蚀的火山岩将导致斑岩型矿床很难被发现。

因此,在冈底斯成矿带西段寻找斑岩型矿床不仅要关注始新世和渐新世末—中新世的岩浆活动,

也要同时关注晚三叠世、中侏罗世、晚白垩世和古新世的斑岩体;南北向构造和近东西向构造交汇仍然是冈底斯成矿带西段寻找斑岩型铜矿床最有利位置.因为多组构造的交汇部位有利于岩浆侵位和成矿,且多期次构造活动易于将深部的斑岩型矿床抬升至地表而被发现;明确地表矽卡岩型矿化、浅成低温热液型矿化与深部斑岩型矿化的时空关系,特别关注覆盖在斑岩型铜矿床之上的火山岩异常.

5.2 浅成低温热液型矿床勘查

前已述及,冈底斯成矿带西段存在中侏罗世、晚白垩世、晚白垩世—古新世和渐新世末—中新世等多期浅成低温热液成矿作用.其中,以纳如松多、斯弄多为代表的晚白垩世—古新世浅成低温热液成矿事件规模最大.纳如松多和斯弄多等矿床受区域性断裂的控制,产于南北向断裂与火山机构交汇部位,受控于隐爆角砾岩筒矿等火山机构,其成矿作用与林子宗群典中组火山岩有关(纪现华等, 2014;刘英超等, 2015;唐菊兴等, 2016;丁帅等, 2017).林子宗群典中组火山岩源区受控于冈底斯地壳基底,是俯冲和再循环的大陆地壳物质与地幔岩混合作用的产物,冈底斯成矿带西段典中组火山岩混染了较多古老地壳物质,从而利于形成铅锌银矿床.由此可见,冈底斯成矿带西段谢通门县—革吉县南大面积出露林子宗群火山岩,具有寻找浅成低温热液型矿床的物质基础,而区域性断裂与火山机构的复合部位是成矿最有利的地段.这也得到了地球化学测量成果的支持,在西藏谢通门展咱木部、春哲地区,以及昂仁县打加错地区等林子宗群火山岩地区都出现了不同规模的铅锌银等元素异常(杜保峰等, 2018).此外,拉萨地块中部和南部则弄群和桑日群等火山岩建造中也发现了热液型金、银铅锌矿点,表明则弄群和桑日群中也具有寻找与火山岩一次火山岩相关的热液型矿床的前景.

斑岩型矿床与浅成低温热液型矿床常在时空上常相依出现,构成一套完整的斑岩—浅成低温热液成矿系统.在朱诺整装勘查区内发现的罗布真金银矿床和红山铜矿床在时空演化上具有明显的一致性,二者受控于同一构造—岩浆作用,形成以渐新世末—二长花岗斑岩为核心,自中心向外逐渐为斑岩铜矿床、浅成低温热液型金银矿床的斑岩—浅成低温热液型成矿系统(Sun *et al.*, 2017);雄村斑岩型铜金矿床和外围火山机构控制的洞嘎金矿床构成中侏罗世斑岩—浅成低温热液型成矿系统(唐菊兴

等, 2014).因此,寻找与斑岩型矿床成矿系统有关的浅成低温热液型矿床是下一步勘查的重要方向.

5.3 矽卡岩型矿床勘查问题

矽卡岩型矿床在冈底斯成矿带西段分布十分广泛,具有多期次成矿的特点.从目前已发现的矽卡岩型矿床的形成条件来看,矽卡岩矿床与岩浆岩、围岩性质,以及接触带构造关系密切.岩浆岩是矽卡岩型矿床成矿物质主要来源,其源区性质和类型影响了矿化类型.如俯冲成因的I型花岗岩易形成铁铜金矿化,碰撞成因的S型花岗岩则与铅锌矿化有关;围岩岩性对矽卡岩型矿床的形成有重要的影响,灰岩等碳酸盐类岩石化学性质活泼,渗透性强而易被交代形成矽卡岩;区域近东西向构造控制了岩浆岩的展布,而接触带构造、断裂,以及捕虏体等制约了矿体形态、分布和规模.因此,不同时期的中酸性侵入岩和碳酸盐岩地层接触部位是寻找矽卡岩型矿床的有利地区.冈底斯成矿带西段中、北部的永珠组、下拉组、拉嘎组、郎山组等含碳酸盐岩地层与中酸性岩浆岩接触交代部位是寻找矽卡岩型铁、铜金、铅锌矿床最有利地段,而南部在捷嘎组等白垩纪海相火山沉积地层也有望找到矽卡岩型铁、铜金多金属矿床.

6 结论

(1)冈底斯成矿带西段金属矿床(点)类型主要有矽卡岩型、斑岩型和浅成低温热液型,矿床在空间分布上具有东西成带,相对集中的特征,其成矿时代集中于中、新生代.

(2)冈底斯成矿带西段发育5期关键成矿作用,分别为晚三叠世—晚白垩世与新特提斯洋北向俯冲有关的铜金多金属成矿作用、中侏罗世—早白垩世与中特提斯洋南向俯冲有关的铁铜金多金属成矿作用、早白垩世末—晚白垩世与羌塘—拉萨地块碰撞有关的铜金钼成矿作用、晚白垩世末—始新世与印度—亚洲大陆碰撞有关的铜铅锌银多金属成矿作用、渐新世末—中新世与印度—亚洲大陆后碰撞伸展有关的铜金钼多金属成矿作用.

(3)冈底斯成矿带西段优势矿种为铜、铁、铅、锌、金银.今后的找矿工作应以矽卡岩型矿床、浅成低温热液型矿床和斑岩型矿床为主攻矿床类型.

致谢:感谢编辑老师和匿名审稿专家提出的宝贵意见!

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>).

References

- Cao, S.H., Li, D.W., Yu, Z.Z., et al., 2007. Metallogenic and Geological Characteristics of the Nixiong Superlarge Magnetite Deposit in Gangdese, Tibet. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(3): 328—334(in Chinese with English abstract).
- Ding, S., Chen, Y.C., Tang, J.X., et al., 2017. Relationship between Linzizong Volcanic Rocks and Mineralization: A Case Study of Sinongduo Epithermal Ag-Pb-Zn Deposit. *Mineral Deposits*, 36(5): 1074—1092(in Chinese with English abstract).
- Du, B.F., Yang, C.Q., Chai, J.Y., et al., 2018. The Effect of Stream Sediment Survey for Prospecting in Chunzhe Area, Tibet. *Geology in China*, 45(3): 604—616(in Chinese with English abstract).
- Duan, Z.M., Li, G.M., Li, Y.X., et al., 2014. Geochronology and Geochemical Characteristics of Ore-Bearing Porphyry in Longgen Lead-Zinc Deposit of Middle-Gangdese Metallogenic Belt, Tibet. *Mineral Deposits*, 33(3): 625—638(in Chinese with English abstract).
- Fan, S.F., Xu, G.L., Zhang, J.D., et al., 2011. Mineralization Characteristics of Iron-Polymetallic Deposits in the Ali Area, Tibet. *Hebei Geology*, (2): 37—41(in Chinese with English abstract).
- Fei, F., Yang, Z.S., Liu, Y.C., et al., 2015. Petrogenetic Epoch of the Rock Mass in the Lunggar Iron Deposit of Coqen County, Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 568—580(in Chinese with English abstract).
- Gao, S.B., 2015. Copper-Iron Polymetal Metallogenesis and Exploration Direction in the Western of Gangdise Metallogenic Belt, Tibet(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Gou, Z.B., Liu, H., Li, J., et al., 2018. The Petrogenesis and Tectonic Significance of Early Cretaceous Volcanic Rocks in Nixiong Area from the Central and Northern Lhasa Terrane. *Earth Science*, 43(8): 2780—2794(in Chinese with English abstract).
- Hou, Z.Q., Pan, G.T., Wang, A.J., et al., 2006b. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: II. Mineralization in Late-Collisional Transformation Setting. *Mineral Deposits*, 25(5): 521—543(in Chinese with English abstract).
- Hou, Z.Q., Yang, Z.S., Xu, W.Y., et al., 2006a. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: I. Mineralization in Main Collisional Orogenic Setting. *Mineral Deposits*, 25(4): 337—358(in Chinese with English abstract).
- Hou, Z.Q., Zhang, H.R., Pan, X.F., et al., 2011. Porphyry Cu (-Mo-Au) Deposits Related to Melting of Thickened Mafic Lower Crust: Examples from the Eastern Tethyan Metallogenic Domain. *Ore Geology Reviews*, 39(1—2): 21—45. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.09.002>
- Huang, H.X., Li, G.M., Chen, H.A., et al., 2013. Molybdenite Re-Os Isotope Age and Metallogenic Significance of Sebuda Copper Molybdenum Deposit in Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 87(2): 240—244(in Chinese with English abstract).
- Huang, H.X., Li, G.M., Liu, B., et al., 2012. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of the Tiangongnile Skarn-Type Cu-Au Deposit in Zhongba County, Tibet: Their Genetic and Tectonic Setting Significance. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 424—434(in Chinese with English abstract).
- Huang, P.C., Zheng, Y.Y., Gao, S.B., et al., 2015. Geochemical Characteristics and Prospecting Significance of Bangbule Pb-Zn-Cu-Fe Deposit, Tibet. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(Suppl.1):394(in Chinese with English abstract).
- Huang, Y., Li, G.M., Ding, J., et al., 2017. Origin of the Newly Discovered Zhunuo Porphyry Cu-Mo-Au Deposit in the Western Part of the Gangdese Porphyry Copper Belt in the Southern Tibetan Plateau, SW China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(1): 109—134. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13066>
- Huang, Y., Tang, J.X., Lang, X.H., et al., 2011. Geochemical Characteristics of Intrusive and Volcanic Rocks in No. II Ore Body of Xiongcu Copper-Gold Deposit, Tibet: Constraints on Rock Genesis and Tectonic Setting. *Mineral Deposits*, 30(2): 361—373(in Chinese with English abstract).
- Ji, X.H., Meng, X.J., Yang, Z.S., et al., 2014. The Ar-Ar Geochronology of Sericite from the Cryptoexplosive Breccia Type Pb-Zn Deposit in Narusongduo, Tibet and Its Geological Significance. *Geology and Exploration*, 50(2): 281—290(in Chinese with English abstract).
- Li, Y.C., Huang, H.X., Liu, H., et al., 2017. Gold Mineralization in the Bangong Lake-Nujiang Metallogenic Zone, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37(2): 1—13(in Chinese with English abstract).
- Liu, H., Li, G.M., Huang, H.X., et al., 2018. Petrogenesis of Late Cretaceous Jiangla' angzong I-Type Granite in Central Lhasa Terrane, Tibet, China: Constraints from Whole-Rock Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology, and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(4): 1396—1414. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13634>
- Liu, Y.C., Ji, X.H., Hou, Z.Q., et al., 2015. The Establishment of an Independent Pb-Zn Mineralization System Related to Magmatism: A Case Study of the Narusong-

- duo Pb-Zn Deposit in Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 539—556(in Chinese with English abstract).
- Mo, X.X., Zhao, Z.D., Zhu, D.C., et al., 2009. On the Lithosphere of Indo-Asia Collision Zone in Southern Tibet: Petrological and Geochemical Constraints. *Earth Science*, 34(1): 17—27(in Chinese with English abstract).
- Pan, G.T., Mo, X.X., Hou, Z.Q., et al., 2006. Spatial-Temporal Framework of the Gangdese Orogenic Belt and Its Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521—533(in Chinese with English abstract).
- Qu, X.M., Xin, H.B., Xu, W.Y., 2007. Petrogenesis of the Ore-Hosting Volcanic Rocks and Their Contribution to Mineralization in Xiongcu Superlarge Cu-Au Deposit, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 964—971(in Chinese with English abstract).
- Sun, X., Zheng, Y. Y., Li, M., et al., 2017. Genesis of Luobuzhen Pb-Zn Veins: Implications for Porphyry Cu Systems and Exploration Targeting at Luobuzhen-Dongshibu in Western Gangdese Belt, Southern Tibet. *Ore Geology Reviews*, 82: 252—267. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.016>
- Tang, J.X., Ding, S., Meng, Z., et al., 2016. The First Discovery of the Low Sulfidation Epithermal Deposit in Linzizong Volcanics, Tibet: A Case Study of the Sinongduo Ag Polymetallic Deposit. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(4): 461—470(in Chinese with English abstract).
- Tang, J.X., Lang, X.H., Xie, F.W., et al., 2015. Geological Characteristics and Genesis of the Jurassic No. I Porphyry Cu-Au Deposit in the Xiongcu District, Gangdese Porphyry Copper Belt, Tibet. *Ore Geology Reviews*, 70: 438—456.
- Tang, J.X., Wang, Q., Yang, C., et al., 2014. Two Porphyry-Epithermal Deposit Metallogenic Subseries in Tibetan Plateau: Practice of “Absence Prospecting” Deposit Metallogenic Series. *Mineral Deposits*, 33(6): 1151—1170(in Chinese with English abstract).
- Tang, J.X., Wang, Q., Yang, H.H., et al., 2017. Mineralization, Exploration and Resource Potential of Porphyry-Skarn-Epithermal Copper Polymetallic Deposits in Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(5): 571—613(in Chinese with English abstract).
- Wang, R., Weinberg, R. F., Collins, W. J., et al., 2018. Origin of Postcollisional Magmas and Formation of Porphyry Cu Deposits in Southern Tibet. *Earth-Science Reviews*, 181: 122—143.
- Xin, H.B., Qu, X.M., 2006. Geological Characteristics and Ore-Forming Epoch of Ri'a Copper Deposit Related to Bimodal Rock Series in Coqen County, Western Tibet. *Mineral Deposits*, 25(4): 477—482(in Chinese with English abstract).
- Xing, J.B., Ge, L.S., Zou, Y.L., et al., 2003. Geological Geochemical Character of Dongga Gold Deposit in Xietongmen County, Tibet. *Gold Geology*, 9(2): 28—32(in Chinese with English abstract).
- Yu, H.X., Chen, J.L., Xu, J.F., et al., 2011. Geochemistry and Origin of Late Cretaceous (~90 Ma) Ore-Bearing Porphyry of Balazha in Mid-Northern Lhasa Terrane, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2011—2022(in Chinese with English abstract).
- Yu, T., 2018. Geological Characteristics and Prospecting Indicator of Zexue Stratabound Hydrothermal Skarn Type Pb-Zn Deposit in Xietongmen County, Tibet. *Modern Mining*, 34(1): 28—32(in Chinese with English abstract).
- Yu, Y.S., Yang, Z.S., Liu, Y.C., et al., 2012. Mineralogical Characteristics and ^{40}Ar - ^{39}Ar Dating of Phlogopite from the Gunjiu Iron Deposit in the Nixiong Ore Field, Coqen, Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(5): 681—690(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.X., Wang, Q., Zhu, D.C., et al., 2013. Mapping the Lhasa Terrane through Zircon Hf Isotopes: Constraints on the Nature of the Crust and Metallogenic Potential. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3681—3688(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.Q., Zhu, D.C., Zhao, Z.D., et al., 2010. Petrogenesis of the Nixiong Pluton in Coqen, Tibet and Its Potential Significance for the Nixiong Fe-Rich Mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1793—1804(in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.Y., Yang, Z.S., Liu, Y.C., et al., 2013. ^{40}Ar / ^{39}Ar Dating of Sericite from Xialong Pb-Zn-Ag Deposit and Its Geological Significance. *Mineral Deposits*, 32(5): 963—971(in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y., Zhang, G. Y., Xu, R. K., et al., 2007. Geochronologic Constraints on Magmatic Intrusions and Mineralization of the Zhunuo Porphyry Copper Deposit in Gangdese, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 52(22): 3139—3147. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-0406-7>
- Zhu, D.C., Li, S.M., Cawood, P.A., et al., 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang Terranes in Central Tibet by Divergent Double Subduction. *Lithos*, 245: 7—17.
- Zhu, D. C., Mo, X. X., Niu, Y. L., et al., 2009. Geochemical Investigation of Early Cretaceous Igneous Rocks along an East-West Traverse throughout the Central Lhasa Terrane, Tibet. *Chemical Geology*, 268(3—4): 298—312. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.008>

- Zhu, D. C., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2011. The Lhasa Terrane: Record of a Microcontinent and Its Histories of Drift and Growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1–2): 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005>
- Zhu, D. C., Wang, Q., Zhao, Z. D., 2017. Constraining Quantitatively the Timing and Process of Continent-Continent Collision Using Magmatic Record: Method and Examples. *Science China: Earth Sciences*, 60(6): 1040–1056.
- 附中文参考文献**
- 曹圣华, 李德威, 余忠珍, 等, 2007. 西藏冈底斯尼雄超大型富铁矿的成矿地质特征. *大地构造与成矿学*, 31(3): 328–334.
- 丁帅, 陈毓川, 唐菊兴, 等, 2017. 林子宗群火山岩与成矿关系: 以斯弄多浅成低温热液型矿床为例. *矿床地质*, 36(5): 1074–1092.
- 杜保峰, 杨长青, 柴建玉, 等, 2018. 水系沉积物测量在西藏春哲地区找矿效果. *中国地质*, 45(3): 604–616.
- 段志明, 李光明, 李应栩, 等, 2014. 中冈底斯成矿带龙根铅锌矿床含矿斑岩年代学与地球化学特征. *矿床地质*, 33(3): 625–638.
- 范三伏, 徐桂林, 张计东, 等, 2011. 西藏阿里地区哥布弄巴铁及多金属矿床成矿地质特征. *河北地质*, (2): 37–41.
- 费凡, 杨竹森, 刘英超, 等, 2015. 西藏措勤隆格尔铁岩体成岩时代及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 34(4): 568–580.
- 高顺宝, 2015. 西藏冈底斯西段铜铁多金属成矿作用与找矿方向(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 苟正彬, 刘函, 李俊, 等, 2018. 拉萨地块中北部尼雄地区早白垩世火山岩的成因及构造意义. *地球科学*, 43(8): 2780–2794.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等, 2006b. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用. *矿床地质*, 25(5): 521–543.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等, 2006a. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用. *矿床地质*, 25(4): 337–358.
- 黄瀚霄, 李光明, 陈华安, 等, 2013. 西藏色布塔铜钼矿床中辉钼矿 Re-Os 定年及其成矿意义. *地质学报*, 87(2): 240–244.
- 黄瀚霄, 李光明, 刘波, 等, 2012. 西藏仲巴县天宫尼勒砂卡岩型铜金矿床锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学特征: 对成因及其成矿构造背景的指示. *地球学报*, 33(4): 424–434.
- 黄鹏程, 郑有业, 高顺宝, 等, 2015. 西藏帮布勒铅锌铜铁矿床地球化学特征及找矿意义. *矿物学报*, 35(增刊1): 394.
- 黄勇, 唐菊兴, 郎兴海, 等, 2011. 雄村铜金矿床 II 号矿体侵入岩—火山岩的地球化学特征: 对岩石成因及构造背景的约束. *矿床地质*, 30(2): 361–373.
- 纪现华, 孟祥金, 杨竹森, 等, 2014. 西藏纳如松多隐爆角砾岩型铅锌矿床绢云母 Ar-Ar 定年及其地质意义. *地质与勘探*, 50(2): 281–290.
- 李永灿, 黄瀚霄, 刘洪, 等, 2017. 班公湖—怒江成矿带金成矿规律及成矿作用初讨. *沉积与特提斯地质*, 37(2): 1–13.
- 刘英超, 纪现华, 侯增谦, 等, 2015. 一个与岩浆作用有关的独立铅锌成矿系统的建立: 以西藏纳如松多铅锌矿床为例. *岩石矿物学杂志*, 34(4): 539–556.
- 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 等, 2009. 西藏南部印度—亚洲碰撞带岩石圈: 岩石学—地球化学约束. *地球科学*, 34(1): 17–27.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等, 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化. *岩石学报*, 22(3): 521–533.
- 曲晓明, 辛洪波, 徐文艺, 2007. 西藏雄村特大型铜金矿床容矿火山岩的成因及其对成矿的贡献. *地质学报*, 81(7): 964–971.
- 唐菊兴, 丁帅, 孟展, 等, 2016. 西藏林子宗群火山岩中首次发现低硫化型浅成低温热液型矿床: 以斯弄多银多金属矿为例. *地球学报*, 37(4): 461–470.
- 唐菊兴, 王勤, 杨超, 等, 2014. 青藏高原两个斑岩—浅成低温热液矿床成矿亚系列及其“缺位找矿”之实践. *矿床地质*, 33(6): 1151–1170.
- 唐菊兴, 王勤, 杨欢欢, 等, 2017. 西藏斑岩—矽卡岩—浅成低温热液铜多金属矿成矿作用、勘查方向与资源潜力. *地球学报*, 38(5): 571–613.
- 辛洪波, 曲晓明, 2006. 藏西措勤县日阿与斑(玢)岩有关的铜矿床的矿床地质特征与成矿时代. *矿床地质*, 25(4): 477–482.
- 邢俊兵, 葛良胜, 邹依林, 等, 2003. 西藏谢通门县洞嘎金矿床地质地球化学特征. *黄金地质*, 9(2): 28–32.
- 于涛, 2018. 西藏谢通门县则学层控热液矽卡岩型铅锌矿地质特征及找矿标志. *现代矿业*, 34(1): 28–32.
- 余红霞, 陈建林, 许继峰, 等, 2011. 拉萨地块中北部晚白垩世(约 90 Ma)拔拉扎含矿斑岩地球化学特征及其成因. *岩石学报*, 27(7): 2011–2022.
- 于玉帅, 杨竹森, 刘英超, 等, 2012. 西藏措勤尼雄矿田滚纠铁矿金云母矿物学特征及 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学. *岩石矿物学杂志*, 31(5): 681–690.
- 张立雪, 王青, 朱弟成, 等, 2013. 拉萨地体锆石 Hf 同位素填图: 对地壳性质和成矿潜力的约束. *岩石学报*, 29(11): 3681–3688.
- 张晓倩, 朱弟成, 赵志丹, 等, 2010. 西藏措勤尼雄岩体的岩石成因及其对富 Fe 成矿作用的潜在意义. *岩石学报*, 26(6): 1793–1804.
- 赵晓燕, 杨竹森, 刘英超, 等, 2013. 西藏夏垅铅锌银矿床绢云母 ^{40}Ar / ^{39}Ar 年龄及其地质意义. *矿床地质*, 32(5): 963–971.